

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/FI05/000150

International filing date: 14 March 2005 (14.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: FI
Number: 20040396
Filing date: 15 March 2004 (15.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 03 June 2005 (03.06.2005)

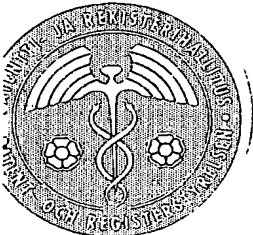
Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

Helsinki 19.5.2005

ETUOIKEUSTODISTUS
PRIORITY DOCUMENT



Hakija
Applicant

1. FM-Kartta Oy, Helsinki
2. Geodeettinen laitos, Kirkkonummi

Patenttihakemus nro
Patent application no

20040396

Tekemispäivä
Filing date

15.03.2004

Kansainvälinen luokka
International class

G06F

Keksinnön nimitys
Title of invention

"Menetelmä puustotunnusten määrittämiseksi laserkeilaimen,
kuvainformaation ja yksittäisten puiden tulkinnan avulla"

Täten todistetaan, että oheiset asiakirjat ovat tarkkoja jäljennöksiä
Patentti- ja rekisterihallitukselle alkuaan annetuista selityksestä,
patenttivaatimuksista, tiivistelmästä ja piirustuksista.

This is to certify that the annexed documents are true copies of the
description, claims, abstract and drawings, originally filed with the
Finnish Patent Office.

Marketta Tehlikoski
Apulaistarkastaja

Maksu 50 €
Fee 50 EUR

Maksu perustuu kauppa- ja teollisuusministeriön antamaan asetukseen 1142/2004
Patentti- ja rekisterihallituksen maksullisista suoritteista muutoksineen.

The fee is based on the Decree with amendments of the Ministry of Trade and Industry
No. 1142/2004 concerning the chargeable services of the National Board of Patents and
Registration of Finland.

Osoite: Arkadiankatu 6 A Puhelin: 09 6939 500 Telefax: 09 6939 5328
P.O.Box 1160 Telephone: + 358 9 6939 500 Telefax: + 358 9 6939 5328
FI-00101 Helsinki, FINLAND

MENETELMÄ PUUSTOTUNNUSTEN MÄÄRITTÄMISEKSI LASERKEILAIMEN, KUVAINFORMAATION JA YKSITTÄISTEN PUIDEN TULKINNAN AVULLA

- 5 Keksinnön kohteena on menetelmä metsien inventointiin ja puustotunnusten määrittämiseen. Menetelmän avulla voidaan määrittää puiden, koealojen, kuvioiden tai laajempien metsäalueiden puustotiedot mittaamalla tai johtamalla yksittäisille puille tärkeimmät tunnusluvut. Menetelmä käyttää laserkeilainta ja toisiaan peittäviä kuvia. Toisiaan peittävien kuvien avulla tihennetään laserpisteparvet ja saatuja tihennettyjä pisteparvia käytetään tunnistamaan yksittäiset puut tai puurykelmät.
- 10 Keksinnön kohteena on myös tietokoneohjelma menetelmän suorittamiseksi.

TEKNIIKAN TASON KUVAUS

- 15 Perinteinen metsien inventointi perustuu vielä suurelta osin maastomittauksiin. Esimerkiksi kuvioittainen arviointi, jossa metsä ensin jaetaan lähes homogeenisiin osiin (kooltaan tyypillisesti 1-3 hehtaaria), perustuu tällä hetkellä koealoilla tehtyihin mittauksiin ja silmävaraisiin havaintoihin. Ilmakuvia tai ortokuvia (karttaprojektioon oikaistua ilmakuvaa) käytetään yleisesti kuviorajojen määrittämiseen ja kulkureitin määrittämiseen metsässä, mutta puustotunnusten, kuten tilavuus (m^3/ha), pohjapinta-ala (m^2/ha , kuvaa 1,3 m korkeudelta katkaistujen puiden peittämän alueen pinta-alaa hehtaaria kohden), keskipituus (m), pohjapinta-alan kaltaiset muut tiheyssuureet, puulaji, ikä ja kehitysluokka, määritetään metsässä tapahtuvilla mittauksilla ja arvioinneilla. Tätä työtä on pyritty tehostamaan myös automatisointia lisäämällä, kenttätietokoneilla ja automaattisemmilla mittavälineillä (esim. patentti FI 101016 B). Kuvioittaisessa arvioinnissa kuvion tunnuksia lasketaan kuvion sisältä saatujen koealakohtaisten tietojen ja silmämääräisten arvioiden perusteella.
- 20 Kuvioittaisen arvioinnin lisäksi tehdään koealakohtaista arviointia, yksittäisten puiden mittaamista ja laajojen alueiden arviointia, kuten valtakunnan tai sen osan arviointia.
- 30 Patentti FI 112402 kuvaa laserkeilaimen perustuvan menetelmän, joka tuottaa laserkeilaimella kolmiulotteisen pituusmallin metsästä. Pituusmallia hahmontunnistusmenetelmin käsittelemällä saadaan yksittäiset puut tunnistettua.

Yksittäisille puille johdetaan kolmiulotteisen mallin avulla pituus, latvuksen leveys ja puulaji. Niiden tietojen avulla johdetaan muut puustotunnukset. Menetelmän etuna on sen erittäin hyvä tarkkuus (n. 10 %) tärkeimmille puustotunnuksille (tilavuus, pohjapinta-ala, keskipituus). Menetelmä kuitenkin edellyttää huomattavan tiheää laserpulssimäärää, mikä mahdollistaa yksittäisten puiden erottumisen pelkällä laseraineistolla. Nyt esitetty keksintö poistaa tämän edellytyksen. On kustannustehokkaampaa tehdä mittauksia laserkeilaimella korkeammalta, jolloin samalla lennolla katetaan leveämpi alue. Toisaalta tällöin laserin tuottama näytemäärä kohteesta vähenee. Tämä vähennys voidaan kompensoida ottamalla ilmakuvia ja tihentämällä ilmakuvablokkien avulla laserpisteparvet. Tällaista ratkaisua ei ole käytetty missään aikaisemmin. Ilmakuvauksen kustannukset ovat vain murto-osa laserkeilauksen kustannuksista.

Aikaisemmat ratkaisut ovat perustuneet joko ilmakuvilta tehtäviin metsän latvamalleihin, joihin voidaan yhdistää laserin tuottama maastomalli (St. Onge and Achaia, *Measuring forest canopy height using a combination of lidar and aerial photography data*, <http://larsees.geg.queensu.ca/lidar/publications/st-onge.pdf>), ilmakuvilta ja laserilta erikseen tehtyihin yksittäisten puiden tunnistamiseen (Leckie, Gougeon, Hill, Quinn, Armstrong, Shreenan, 2003, *Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis*, *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 29, No. 5, ss. 633-649), tekstuutiedon liittäminen ilmakuvista lasermallien päälle (Fujii, Arikawa, 2002, *Urban Object reconstruction using airborne laser elevation image and aerial image*, *IEEE Transactions on Geosc. and Rem. Sens.*, Vol. 40, No. 10, ss. 2234-2240), laajojen metsäalojen segmentointiin ja laserin tuottaman pituustiedon yleistämiseen laajemmille alueille (Wulder ja Sheeman, 2003, *Forest inventory height update through the integration of lidar data with segmented Landsat imagery*, *Can. J. Rem. Sens.*, Vol. 29, No. 5, ss. 536-543). Lisäksi konseptit laserin ja ilmakuvan yhdistäminen puulajitiedon tuottamiseksi on esitetty patentissa FI 112402.

Keksinnön tarkoituksena on aikaansaada kaukohavainnointimenetelmä metsien inventointiin ja puustotunnusten määrittämiseen, joka on kaukokartoitusmateriaalikustannuksiltaan keksintöä FI 112402 huomattavasti

- edullisempi, mutta joka silti tuottaa varsin tarkkaa tietoa. Menetelmä hyödyntää sekä toisiaan peittäviä kuvia (kuten ilmakuvia, satelliittikuvia ja videokuvia) että laserkeilainmittauksia. Laserkeilaimen tuottaman pulssimäärän täytyy olla vain murto-osa patentin FI 112402 vaatimuksesta, mikä tarvittaessa mahdollistaa korkean lentokorkeuden ja leveän keilausalueen (edullisuuden). Menetelmä on tarkoitettu erityisesti operatiiviseen kuvioittaiseen arviointiin.

YHTEENVETO KEKSINNÖSTÄ

- 10 Keksinnön kohteena on menetelmä metsien inventointiin ja puustotunnusten määrittämiseen. Menetelmän avulla voidaan mitata puiden, koealojen, kuvioiden tai laajempien metsäalueiden puustotiedot mittaamalla ja johtamalla yksittäisille puille tärkeimmät tunnusluvut. Puustosta kerätään kolmiulotteista tietoa puustoalueelta käyttämällä sellaista määrää näytepisteitä, että yksittäiset puut tai puuryhmät
- 15 erottuvat toisistaan. Tällainen näytepistemäärä saadaan tihentämällä harvahko laserpisteparvi toisiaan peittävien kuvien avulla lasketun puiden latvoja myötäilevän pintamallin avulla. Menetelmä käyttää laserkeilainta ja toisiaan peittäviä kuvia. Toisiaan peittävien kuvien avulla tihennetään laserpisteparvet ja saatuja tihennettyjä pisteparvia käytetään tunnistamaan yksittäiset puut ja puurykelmät. Keksinnön kohteena on myös tietokoneohjelma menetelmän suorittamiseksi.

Puustotunnusten määrittäminen keksinnössä tapahtuu edullisimmin seuraavissa vaiheissa

- 25 1) Laserkeilainmittauksen ja toisiaan peittävien kuvien tuottaminen puustoalueelta.
- 2) Kuvainformaation ja lasermittausten laskeminen samaan koordinaatistoon
- 3) Laserkeilauksen pisteparven tihentäminen toisiaan peittävien kuvien avulla
- 4) Yksittäisten puiden ja puurykelmien tunnistaminen pisteparvista hahmontunnistusmenetelmin
- 30 5) Puustotunnusten laskeminen yksittäisten puiden ja puurykelmien avulla erilaisiin sovelluksiin

Keksinnön mukaisen menetelmän vaiheet 2-5 voidaan toteuttaa tietokoneohjelman avulla.

- 5 Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä, monilla talousmetsäalueilla ja muillakin metsäalueilla on selviä aukkoja puiden välissä. Suomessa noin 30 % laserpulsseista heijastuu maasta. Keksintö FI 112402 hyödynsi tätä seikkaa siten, että runsaalla laserkeilaimen pulssimäärällä saadaan yksittäiset puut mitattua. Tämä keksintö hyödyntää sitä siinä suhteessa, että varsin pienelläkin pulssimäärällä saadaan 10 näytteitä maasta, mikä mahdollistaa karkean mutta riittävän tarkan maastomallin tuottamisen. Laserkeilaimella saadaan tuotettua pienilläkin pulssimäärillä maastomallia, jonka tarkkuus on noin 0.5 m. Metsien kuvioittaista inventointia ajatellen tarkkuus on riittävä.

- 15 Laserkeilauksen tuottamat pisteparvet ja kuvainformaatio tulee saattaa samaan koordinaattijärjestelmään, jotta eri lähteistä saatu informaatio voidaan yhdistää samaan kohteeseen kuuluvaksi. Koordinaattimuunnokseen käytetään eri koordinaatistojen välisiä tunnettuja muunnoskaavoja. Yhteensopivuutta parannetaan edelleen tunnistamalla eri aineistoista joukko toisiaan vastaavia, ympäristöstä hyvin erottuvia kohteita ja laskemalla näistä regressioanalyysillä parametrisen 20 muunnosmalli.

- 25 Laserkeilauksen tuottamasta harvasta pisteparvesta erotetaan maan pinnasta mitatut pisteet ja maan pinnan yläpuolelta mitatut pisteet käyttämällä tunnettuja menetelmiä, kuten Terrascan-ohjelmistoa. Puun latvus muodostaa valtaosan puun poikkipinta-alasta laserkeilaimen suunnasta katsottuna ja siksi valtaosa maan pinnan yläpuolelta mitatuista pisteistä osuu puuston latvukseen. Näitä pisteitä käytetään lähtökohtina automaattisessa käsittelyssä, jossa kuva-aineiston stereopareista tuotetaan lisää pisteitä lähtöpisteiden (laserin tuottamat pisteet) läheltä.

- 30 Pisteparvien avulla voidaan tunnistaa yksittäiset puut tai puurykelmät käyttäen latvamalleja, laserin intensiteettitietoa ja ilmakuvan sävyarvoja.

Puustotunnusten laskeminen tapahtuu yksittäisten puiden tai puurykelmien avulla. Puurykelmistä pyritään tunnistamaan tilastollisesti puiden lukumäärä. Puustotunnusten laskemisessa voidaan käyttää useaa periaatetta. Tihennetyn pisteparven avulla voidaan laskea jokaiselle puulle pituus, puulaji ja latvuksen leveys. Näiden tunnusten avulla voidaan määrittää yksittäisen puun pohjapinta-ala, tilavuus, läpimitta, ikä ja kehitysluokka. Ilman laserin ja ilmakuvan tuottamaa puuston pituustietoa yksittäisen puun tilavuusestimaatit ovat varsin epätarkkoja. Vaihtoehtoisia laskentatapoja ovat näytepuiden valitseminen ja latvuspeittoprosentin hyödyntäminen analyyseissä. Näytepuita voidaan valita silloin kun laserin tuottama pisteparvi on niin harva, että laserilla ei saada jokaisesta puusta edes näytettä. Tällöin valitaan vain ne puut, joista laser saa näytteen, mutta valitaan tihennetystä pisteparvesta puun korkein piste kuitenkin kuvaamaan kyseisen puun pituutta. Tässä laskentatavassa näytepuiden oletetaan edustavan valtapuustoa satunnaisesti. Puiden lukumäärä saadaan laskettua samalla tavoin hahmontunnistuksen menetelmillä kuin edellä kuvatussa perusmenetelmässä. Tiheissä puuryppäissä ja harvemmissa pisteparvissa laskenta kannattaa suorittaa tihennettyjen pisteparvien ja hahmontunnistuksen tuottamien näytepituuksien ja latvuspeittoprosentin avulla, koska arvioitu runkoluku on aliarvio todellisesta runkoluvusta.

20 Tässä keksinnössä esitetty menetelmä on halvin kaikista tähänastisista metsien inventoinnin kaukohavainnointimenetelmistä, jotka tuottavat noin 15 % tarkkuudella puustotunnustiedot. Keksinnön etuna tyypillisiin kaukohavainnointimielmiin nähden on myös se, että keksinnön menetelmällä mitataan kohteesta selviä fysikaalisia tunnuksia etäisyysdatan muodossa, joille voidaan johtaa yleisesti tunnettujen yhtälöiden avulla puun tunnuksia, kuten tilavuus. Näin ollen menetelmä ei välttämättä vaadi koealojen käyttöä opetusaineistona, mikä pienentää menetelmästä johtuvia kustannuksia.

30 Keksinnössä on oivallettu hyödyntää vaatimatonta pulssitiheyttä tuottavien lasertutkien käyttökelpoisuus puuston arvioinnissa yhdessä kuvainformaation kanssa. Aikaisemmat tutkimukset (kuten Nässet, 1997) epäonnistuivat tuottamaan samanlaisella aineistolla tarkkoja tuloksia. Vaatimaton pulssimäärä mahdollistaa laseraineiston halpenemisen, mikä on usealle käyttäjälle tärkeää.

Keksinnön mukainen menetelmä pystyy yleisesti ottaen tuottamaan puuston tilavuusestimaatteja 10-20 % virheellä kuviotasolla pohjoisella havumetsävyöhykkeellä, mikä on riittävä tarkkuus käytännön mittauksien näkökulmasta. Menetelmä on sovellettavissa myös muuallakin, erityisesti tropiikin istutusmetsissä. Menetelmän kustannustehokkuutta nostaa jatkuva laserkeilaimien kehittyminen ja aineistojen yleistyminen. Menetelmän automatisointi tai puoliautomatisointi (kerätyn aineiston prosessointi tietokoneella) on myös mahdollista.

Seuraavassa keksintö esitetään yksityiskohtaisesti kuvioiden ja esimerkkien avulla, joita ei ole tarkoitettu keksinnön rajoittamiseksi millään tavalla.

KUVIOT

Kuvio 1 on periaatekuva toisiaan peittävien kuvien mittaamiseksi ilmasta.

Kuvio 2 on periaatekuva laserkeilauksen mittaustilanteesta

Kuvio 3 on periaatekuva fotogrammetrisesta tihennyksestä käyttäen toisiaan peittäviä kuvia ja laserkeilauksen pisteparvia.

Kuvio 4 on periaatekuva fotogrammetrisesta pisteenmäärittämisestä

Kuvio 5 on esimerkkikuva puun latvuksesta, jolle on määritetty tihennetty pisteparvi kuvien avulla. Laserpisteet on kuvattu X:llä ja tihennetyt pisteet on merkitty valkoisilla neliöillä.

Kuvio 6 on vuokaavio yksittäisten puiden tai puuryhmien tunnistamiseen kehitetystä menetelmästä

Kuvio 7 on esimerkkikuva puun kasvun mittaamisesta eri ajanhetkinä otettujen pisteparvien avulla. Valkoiset pisteet kuvaavat samaa puuta kuin mustat pisteet, mutta paria vuotta myöhemmin kuvattuna.

Kuvio 8 on esimerkkikuva, miten erittäin hyvälaatuisesta tihennetystä pisteparvesta voidaan määrittää kaadetut ja kaatuneet puut

Kuvio 9 on vuokaavio kaadettujen ja kaatuneiden puiden automaattiseksi havainnoimiseksi hahmontunnistusmenetelmin

Kuvio 10 on vuokaavio puustotunnusten laskemiseen fotogrammetrisesti tihennetyistä pisteparvista.

Kuvio 11 on vuokaavio puustotunnusten määrittämiseen ajantasaistuksen keinoin kahden eri ajanhetken aineistoista.

5

Kuviot 1-11 ovat karkeita kuvioita mittaustapahtuman ja prosessien selkeyttämiseksi.

KEKSINNÖN YKSITYISKOHTAINEN KUVAAUS

10 Laserkeilainmittauksen ja hyväresoluutioisen ilmakuvablokin tuottaminen puustoalueelta

Kuvioissa 1 ja 2 on esitetty yleiskuva keksinnön mukaisen menetelmän mittaustilanteesta. Sekä lasermittaus että ilmakuvaukset tehdään lentävästä aluksesta

15 (lentokone, helikopteri, miehittämätön lentoalus, lennokki) puuston yläpuolelta. Näistä lentokone on tällä hetkellä tasaisilla alueilla paras alusta, helikopteri vuoristoisilla alueilla ja kustannuksiltaan edullisin on automaattiohjattu miehittämätön lentoalus tai lennokki. Laitteet (laserkeilaus ja ilmakuvakamera) voivat olla joko yhtäaikaan lentävässä aluksessa tai lennot voidaan tehdä eri aikoina. Etu

20 samanaikaisessa mittauksessa on se, että aineistot voidaan georeferoida samoilla GPS/IMU-havainnoilla ja ne ovat muutenkin geometrisesti lähempänä toisiaan. Myös lentokustannukset ovat edullisemmat. Eri aikoina tehtävien mittausten etu on se, kuvauksia tehdään kaikissa mahdollisissa olosuhteissa aina kun se on mahdollista jommalla kummalla instrumentilla. Laserkeilaus on lentointensiivisempää toimintaa, koska kuvauksessa katettu alue on tyypillisesti nauhamaista, mutta ilmakuvaukset on 25 herkempi sääolosuhteille. Metsäalueilla laserkeilauskulmat ovat maksimissaan ± 15 astetta vertikaalista. Koska laserkeilain on aktiivinen laite, laserkeilausta voidaan tehdä myös yöaikaan. Ilmakuvakamera voi olla joko filmikamera tai digitaalinen kamera.

30

Laserkeilain, kuvio 2, koostuu keilainosasta (a), joka aiheuttaa lentosuuntaa vastaisen poikkeutuksen, lasertykistä (b), joka tuottaa laserpulssit, ja ilmaisinosasta (c), joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden

kohteeseen. Laser-keilaimen lasertykin lähettämän laserpulssin (d) kohteeseen ja takaisin käyttämän kulkuajan perusteella voidaan määrittää kohteen ja laserin välinen etäisyys. Kun lasertykin asento ja paikka ovat tarkasti tunnetut, mitattu etäisyys lasertykin ja kohteen (e) välillä voidaan muuttaa korkeudeksi (f); tähän perustuu koko laserin avulla tapahtuvan pintamallin mittaaminen. Laserlaitteen asento ja sijainti määritetään tyypillisesti inertiajärjestelmän ja GPS-mittauksen (g) avulla (Global Positioning System, maailmanlaajuinen satelliittiverkosto paikantamiseen). Inertiajärjestelmä mittaa joko pelkkää asentoa tai asentoa ja paikkaa inertia-antureita käyttäen. Laserkeilaintekniikan GPS-mittauksessa on yksi GPS-vastaanotin, joka on samassa lentävässä alustassa kuin laserkeilain ja maassa on toinen GPS-vastaanotin referenssiasemana (h), kuvio 2, tutkittavan alueen lähietäisyydessä, esimerkiksi 30 km säteellä. Virtuaali-GPS-tekniikan avulla tulevaisuudessa voitaneen luopua mittauksen lähistöllä olevista referenssimaa- asemista.

Kuvan tuottaminen laserilla tapahtuu keilaimen avulla, joka pyyhkäisee laser-pulssia lentosuuntaa vastaan kohtisuoraan. Toisessa suunnassa kuva muodostuu lentävän alustan siirtyessä pitkin lentolinjaa. Tällä tavalla katetaan koko kohteen ala. Lasertykin ja keilaimen ominaisuuksista (pulssitoistotaajuudesta, rinnakkaisten pulssien määrästä, keilaimen maksimaalisesta keilauskulmasta ja keilaustavasta), lentokorkeudesta ja lentonopeudesta määräytyvät mm. maanpintaan vierekkäisten keilojen (keilan halkaisija tyypillisesti muutama kymmen senttimetriä) etäisyydet. Keilausmekanismeja on useita. Kartiokeilauksessa mittauskulma kohteeseen pysyy koko ajan vakiona. Nk. pushbroom-keilauksessa rinnakkaisten keilojen orientaatio toisiinsa nähden on aina vakio.

Ilmakuvauksessa Auringon valon siroaminen kohteesta tallennetaan mittakameran avulla joko filmille tai sähköisesti. Ilmakuvauksia tehdään mm. Suomessa, kun Auringon korkeuskulma on yli 33 astetta. Fotogrammetrisen kartoituksen päätarkoitus on tuottaa kolmiulotteista tietoa kohteesta. Kohteen kolmiulotteiset koordinaatit voidaan ratkaista, mikäli kohde havaitaan vähintään kahdelta eri kuvalta, kuvio 1 ja 4. Kuviossa 1 on esitetty, miten puiden latvapistet P1 ja P2 kuvautuvat useille kuville. Kuvautuessaan kahdelle kuvalle voidaan määrittää pisteiden P1 ja P2

kolmiulotteiset koordinaatit. Kohdekoordinaattien laskenta voidaan tehdä esimerkiksi kolmiulotteisena eteenpäinleikkauksena avaruudessa, kuvio 4. Tyypillisesti fotogrammetrinen kartoitus tehdään stereotulkintana stereokuvilta. Stereokuva muodostuu kahdesta osakuvasta, jotka kumpikin näkevät tarkasteltavan kohteen

5 hieman toisistaan poikkeavista perspektiiveistä. Kun stereokuvapari havaitaan, vasen kuva vasemmalla silmällä ja oikea kuva oikealla, kuvat sulautuvat havaitsijan mielessä yhdeksi ja hän näkee kohteen stereokuvana. Mittaus voidaan tehdä myös kaksikuvamittauksena, jolloin kohde mitataan erikseen kahdelta toisistaan peittävältä

10 kuvalta. Digitaalisten kuvien käytön myötä kuvamittausprosessi voidaan automatisoida käyttämällä laskennallisia kuvansovitusmenetelmiä. Kartoituksen tarkkuus on sitä parempi, mitä useammalta kuvalta sama kohde havaitaan. Fotogrammetrisessa kartoituskuvauksessa kuvataan yleensä laaja kuvablokki (kuvio 1), koska yleensä on kustannustehokkaampaa kuvata samanaikaisesti laajempi alue

15 ja toisaalta, koska kuvien ulkoisten orientointien määrittäminen tarvittavalla tarkkuudella on edullisinta kuvablokin avulla. Kuvablokki muodostuu yleensä useasta toisistaan peittävästä lentolinjasta ja kukin kentolinja muodostuu useasta toisistaan peittävästä ilmakuvasta. Tyypillisesti jonon sisällä peräkkäisten kuvien peittoprosentti on 60% ja vierekkäisten lentolinjojen peittoprosentti on 30%. Ongelmia varsinkin automaattiselle tulkinnalle aiheuttavat kohteen, kuvauksen ja valaistuksen geometriasta aiheutuvat valaistuserot kuvilla. Fotogrammetrian perusteita on esitetty mm. teoksessa (Swidefsky, K., Ackermann, F, 1976. Fotogrammetria. Otapaino, Espoo 1978).

Metsien mittaamisen kannalta tärkeätä on tehdä molemmat mittaukset mahdollisimman kohtisuoraan, jotta katvealueita ei syntyisi puiden taakse. Laserkeilauksessa keilauskulman tulee olla mielellään pienempi kuin 10 astetta vertikaalista, maksimissaan 15 astetta vertikaalista. Koemittauksissa on havaittu katvealueiden syntyvän jopa yli 5 asteen mittauskulmilla. Keksinnön idean mukaisesti taloudellista hyötyä saadaan käyttämällä sellaista laserkeilainta, jolla voidaan lentää mahdollisimman korkealla, ja silti tuottaa kohtuullinen laserpistetiheys, esimerkiksi 0.5 pistettä – 5 pistettä neliömetrillä. Lasereiden pulssintoistotaajuuudet ovat kuitenkin kasvussa. Vuonna 1999 johtavan laserkeilaimia valmistavan yrityksen Optechin pulssintoistotaajuuus oli 10 kHz, nyt vuonna 2004 se

on 100 kHz. Lisäksi on mahdollista mitata koko pulssin muoto (engl. full waveform). Kolmen kilometrin korkeudelta kuitenkin pulssintoistotaajuus on vain 33 kHz. Syynä tähän on se, että nykyisissä järjestelmissä on vain yksi pulssi kerrallaan matkalla. Valon nopeus on siten rajoitteena. Tulevissa järjestelmissä tämä ongelma on kuitenkin korjattu siten, että useita pulsseja on kerrallaan etenemässä. Käyttämällä 33 kHz:n laserkeilainta 3 km:n lentokorkeudelta 66 m/s:n lentonopeudella 10 asteen maksimaalisella poikkeutuksella saadaan pistetiheydeksi 0,5 pulssia neliömetriä kohden. Tällaisesta aineistosta ei voi laskea yksittäisten puiden arvoja. Keksintö tarjoaa käytännön ratkaisun käyttäen harvempiakin laserkeilainpistetiheyksiä ja silti mahdollistaa inventoinnin yksittäisten puiden avulla.

Koska mittaukset tulee tehdä pienillä mittauskulmilla (vertikaaliin nähden), on mitattavan alueen leveys kapea (3000 m lentokorkeudelta keilattu alue 1000 metriä leveä olettaen 10 astetta maksimaaliseksi poikkeutukseksi), minkä vuoksi sovelluksesta riippuen voidaan joutua lentämään useita rinnakkaisia linjoja koko alueen kattamiseksi.

Keksinnön edullisissa suoritusmuodoissa eri mallien luomisessa käytetään hyväksi myös eri laserjärjestelmissä käytettäviä erilaisia tallennustapoja. Koko pulssin tallentamisella voidaan tuottaa tietoa, joka auttaa pisteparvien luokitteluun maapisteisiin ja kasvillisuuspisteisiin sekä auttaa määrittelemään latvapisteen tyyppiä (tiheä latvus, irrallinen oksa, puulaji).

Kuvainformaation ja lasermittausten laskeminen samaan koordinaatistoon

Laserpisteparvet ja ilmakuvat tuotetaan käytetystä GPS-tekniikasta johtuen WGS-84-järjestelmässä (lisätietoja kirjasta *GPS-paikanmääritys* (Markku Poutanen 1998)). Jos ilmakuvauksessa käytetään myös inertiajärjestelmiä, saadaan ilmakuvatkin suoraan georeferoitua ilman maastotukea.

Tällä tavoin laserkeilauksella koko alue tulee katettua pienillä keiloilla, joille voidaan määrittää koordinaatit. Jotta kuvilta mitattujen kohteiden kohdekoordinaatit voidaan

- laskea, tulee ilmakuviin sisäiset (pääpiste, polttoväli) ja ulkoiset orientoinnit (kameran sijainti ja kallistukset kuvanottohetkellä) tuntea. Orientointien määrittäminen on yleisesti tunnettua tekniikkaa. Sisäiset orientoinnit määritetään yleensä laboratoriakalibrointina. Ilmakuviin ulkoiset orientoinnit määritetään nykyään yleisimmin sädekimppuihin perustuvalla blokkitasoitusella, mutta tulevaisuudessa on mahdollista myös suoran georeferoinnin käyttö (ulkoiset orientoinnit määritetään suoraan kuvauksen aikana kerätyistä GPS- ja inertiahavainnoista). Blokkitasoitusta varten tarvitaan kuvablokki (ks. kuvaus edellä). Havaintoina blokkitasoituksessa ovat tyypillisesti toisiaan peittäviltä kuvilta automaattisesti tai interaktiivisesti havaitut
- 10 liitospisteet, kuvauksen aikaiset ulkoisten orientointien havainnot (projektiokeskusten sijainnit ja kallistukset) sekä maastotukipisteet. Tuntemattomina ovat ainakin kohdepisteiden koordinaatit sekä kuvien ulkoiset orientoinnit. Menetelmän periaate on, että kohde- ja kuvakoordinaattien välille muodostetaan havaintoyhtälöt (kollineaarisuusehto), joissa tuntemattomat suureet esiintyvät parametreina.
- 15 Tuntemattomat ratkaistaan käyttäen epälineaarista pienimmän neliösumman menetelmää. Menetelmä on kuvattu mm. teoksessa (Kraus, K. 1993. Photogrammetry. Volume 1 – Fundamentals and Standard Processes. Ferd. Dümmlers Verlag).
- 20 Aineistot muunnetaan haluttuun koordinaattijärjestelmään ja projektiioon (kuten YKJ, KKJ ja ETRS-TM35FIN) käyttäen olemassa olevia konversiofunktioita. Kunkin maan kartoitus- ja maanmittausorganisaatiot ovat kykeneviä toimittamaan tarvittavat konversiotiedot. Tuloksena syntyy maastopistetiedosto, joka käsittää laserpisteparvet yksittäisinä x-,y- ja z-koordinaatteina ja ilmakuviin ulkoiset
- 25 orientoinnit halutussa paikallisessa koordinaatti- ja projektiijärjestelmässä. Koordinaatistojen ja projektioiden määrittämisestä voi lukea teoksesta *Käytännön geodesia* (Martti Tikka 1985).
- 30 Yhteensopivuutta parannetaan edelleen tunnistamalla eri aineistoista joukko toisiaan vastaavia, ympäristöstä hyvin erottuvia kohteita ja laskemalla näistä esimerkiksi regressioanalyysillä parametrisen polynomimuunnosmalli käyttäen tunnettuja menetelmiä.

Laserkeilauksen pisteparven tihentäminen toisiaan peittävien kuvien avulla

Laserkeilauksen pisteparven tihentäminen toisiaan peittävien kuvien avulla on esitetty kuviossa 3 ja esimerkin avulla kuviossa 5.

5

Laserkeilauksen tuottamasta harvasta pisteparvesta erotetaan maan pinnasta mitatut pisteet ja maan pinnan yläpuolelta mitatut pisteet käyttämällä tunnettuja menetelmiä, kuten Terrascan-ohjelmistoa (kts www.terrasolid.fi). Puun latvus muodostaa valtaosan puun poikkipinta-alasta laserkeilaimen suunnasta katsottuna ja

10

siksi valtaosa maan pinnan yläpuolelta mitatuista pisteistä osuu puuston latvukseen. Harva laserpistejoukko ei myöskään osu usein puiden latvojen korkeimpiin kohtiin, jolloin kuvien käyttö lisää mittausten tarkkuutta. Laserpisteitä (a) käytetään lähtökohtina joko manuaalisessa, puoliautomaattisessa tai automaattisessa käsittelyssä, joissa latvuspisteiksi luokiteltujen laserpisteiden läheltä tuotetaan lisää

15

XYZ-koordinaateiltaan tunnettuja pisteitä (b). Kun sama kohde havaitaan kahdelta tai useammalta toisiaan peittävältä kuvalta, kohdekoordinaatit voidaan ratkaista sopivalla fotogrammetrisellä menetelmällä kuten edellä on kuvattu.

Manuaalisessa tapauksessa operaattori mittaa interaktiivisesti lisää latvuspisteitä (b) laser-pisteen ympäristöön stereokuvilta. Taustalla toimiva ohjelma laskee puulle latvusparametrejä ja ohjaa operaattoria pisteiden valinnassa. Ohjelman tulkitsemat latvukset voidaan esittää reaaliaikaisesti kuvien päällä, ja operaattori mittaa tarvittaessa lisää pisteitä. Ohjelma analysoi myös muita puun ominaisuuksia (mm. puulaji), jotka operaattori vahvistaa.

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

20

25

Puoliautomaattinen tapaus on laajennus yllä kuvatusta manuaalisesta menetelmästä. Operaattori edelleen ohjaa ja valvoo mittaustapahtumaa, mutta pisteiden luominen ja mittaustapahtumat automaattisesti kuvansovitusmenetelmällä (kuvaus kuvansovituksesta on alla). Ohjelma generoi kuvansovituksen avulla laserpisteen ympäristöön uusia pisteitä, ja esittää tulkitut latvukset operaattorille reaaliaikaisesti, samaan tapaan kuin manuaalisessa tapauksessa. Operaattori joko hyväksyy tai hylkää tuloksen ja suorittaa tarvittavat korjaustoimenpiteet.

30

30

30

30

30

30

30

30

30

30

30

30

30

Automaattisessa tapauksessa operaattori ei osallistu lainkaan mittausprosessiin, vaan pisteet mitataan automaattisilla kuvansovitusmenetelmillä. Menetelmässä oletetaan, että tulkinta ja mittausprosessi ovat riittävän tarkasti automatisoitavissa. Ohjelmaan tulee myös sisältyä laadunvalvontaosa, joka tarvittaessa käynnistää manuaalisen tai puoliautomaattisen mittauksen.

Puoliautomaattinen ja automaattinen mittaus edellyttävät kuvansovitusmenetelmien käyttöä. Mahdollisia sovitusten menetelmiä on monia ja ne tunnetaan varsin hyvin, mutta niitä ei ole kuitenkaan käytetty aikaisemmin laserkeilauksen tuottaman pisteparven tihentämiseen ja soveltamiseen puustotunnusten arvioinnissa. Kun kuvan spatiaalinen resoluutio on riittävä, puun yksityiskohdat kuvautuvat kuville tekstuurina, jota voidaan hyödyntää automaattisessa kuvansovituksessa. Puun muodon mittaamisessa kysymykseen tulevat sekä piirteisiin että kuvan sävyarvoihin perustuvat kuvansovitusmenetelmät. Kuvan maastoresoluution ollessa n. 5-20 cm, puun tekstuurista voidaan irrottaa mielenkiintoisia pisteitä piirteenirrotusoperaattoreilla, esim. Moravec- tai Förstner-operaattori (Moravec, 1976, „Towards automatic visual obstacle avoidance. Proc. 5th Int. Joint Conference on Artificial Intelligence, Förstner, W, Gülch, E., 1987, A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Targets. Proceedings of Intercommission Conference of Fast Processing of Photogrammetric Data, Interlaken, Switzerland, 1987, ss. 281-305.) Kunkin tiennettävän laserpisteen kohdalla piirteitä irrotetaan joko yhdeltä kuvalta tai useammalta kuvalta, jolla piste esiintyy. Toisiaan vastaavat piirteet tai kohdat tunnistetaan eri kuville geometristen pakkojen avulla (esim. puun 3D-malli) ja/tai harmaasävyihin perustuvaa kuvansovitusta käyttäen (esim. kuvakorrelaatio tai pienimmän neliösumman sovitus) (Ackermann, F., 1984. Digital Image Correlation: Performance and Potential Applications in Photogrammetry. Photogrammetric Record, Vol. 11, No. 64, ss. 429-439. ISSN 0031-868X; Förstner, W., 1986, A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 3/3, ss. 150-160; Förstner, W., 1995, Matching Strategies for Point Transfer. Photogrammetric Week '95, D. Fritsch, D. Hobbie (Toim.), ss. 173-183. ISBN 3-87907-277-9; Lemmens, M.J.P.M., 1988, A Survey on Stereo Matching Techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote

Sensing, Vol. 27, No. B8, ss 11-23). Vaihtoehtoinen kuvansovitusmenetelmä on yksittäisten puiden globaali rekonstruointi. Menetelmä perustuu yleiseen globaaliin kuvansovituksen menetelmään (Ebner, H., Heipke, C. & Holm, M. 1993, Global image matching and surface reconstruction in object space using aerial images. Proc. of SPIE, OE/Aerospace and Remote Sensing: Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision. 14 - 15 April 1993, SPIE Vol. 1944-04, ss. 44 - 57). Yksittäisten puiden globaalissa rekonstruoinnissa oletetaan kuvien ulkoiset orientoinnit tunnetuiksi ja kohteen rekonstruointi tehdään pienellä alueella.

Kuviossa 5 on esitetty, miten latvukseen osuneen yhden laserpulssin (X) avulla on voitu tihentää pisteparvea fotogrammetrisesti. Valkoiset neliöt kuvaavat fotogrammetrisesti tihennettyjä pisteitä.

15 Yksittäisten puiden ja puurykelmien tunnistaminen pisteparvista hahmontunnistusmenetelmin

Yksittäisten puiden ja puurykelmien tunnistaminen pisteparvista tapahtuu osittain interaktiivisen päätetyöskentelyn ja osittain hahmontunnistuksen menetelmin. Erittäin tehokas ja uusi tapa tehdä tämä prosessi on esitetty yksityiskohdin seuraavassa, kuvio 6.

Maastomalli, latvamalli ja puuston pituusmalli voidaan laskea kuten patentissa FI 112402 on kuvattu. Maastomalli voidaan laskea varsin luotettavasti myös ilman kuvainformaatiota harvemmallakin laserpistejoukolla, jota ei ole tihennetty.

Syöttötietoina prosessille annetaan tihennetty pisteparvi (Kuvio 6 kohta a), puuston pituusmalli (b), maastomalli (laskettu tunnetuilla maastomallin laskentamenetelmillä pisteparvista, esimerkiksi Terrascan-ohjelmistolla tai patentissa FI 112402 kuvatulla menetelmällä) ja latvuksia kuvaava latvamalli (laskettu tunnetuilla menetelmillä, kts FI 112402) (c). Vaihtoehtoisesti voidaan antaa syöttötietoina myös opetusalueita rajaavat koordinaattitiedot (c). Aineistojen tulee olla samassa koordinaatistossa. Tihennetyissä pisteparvissa voi myös vaihtoehtoisesti olla ilmakuvilta niille johdettu

sävyarvo (c) ja laserkeilauksen tuottama sironnan intensiteetti (c). Intensiteetti voidaan esittää myös jatkuvana (full waveform) (c).

5 Lähtötietoina segmentointiprosessista saadaan puita tai puurykelmiä vastaavat segmentit (keskipiste ja latvuksia rajaavat vektorit, segmentin pinta-ala, arvio segmentin sisällä olevien puiden lukumäärästä, puun pituus segmentin sisällä ja puulajista) (Kuvio 6 kohta d).

10 Jatkossa prosessia, jossa yksittäisten puiden ja puurykelmien tunnistaminen tapahtuu pisteparvista hahmontunnistusmenetelmin, kutsutaan segmentointiprosessiksi.

Segmentointiprosessissa on esittämässämme ratkaisussa seuraavat työvaiheet

1. Kohdealueen jako pienempiin alueisiin (kuvio 6 kohta e)
- 15 2. Yksittäisiä puita tai puurykelmiä vastaavien lähtöpisteiden etsiminen (f)
3. Heurististen menetelmien käyttö ryhmittelyanalyysissä (vaihtoehtoinen ratkaisu) (c)
4. Yksittäisten puiden tai puurykelmien segmentointi tai ryhmittely (g)
5. Tuotettujen segmenttien analysointi (h)

20 Kohdealueen jako pienempiin alueisiin tehdään käytännön tarpeista, koska tutkittava alue saattaa olla hyvinkin laaja.

25 Lähtöpisteiden etsimistä varten voidaan käyttää apuna puuston pituusmallia, joka on latvamallin ja maastomallin erotus. Puuston pituusmallia voidaan suodattaa alipäästösuodattimella, jotta pienet latvuston yksityiskohdat eivät aiheuta latvan jakautumista liian moneen segmenttiin. Alipäästösuodattimena voidaan käyttää mm. seuraavaa 3x3 konvoluutiosuodatinta

[1 2 1

2 4 2

1 2 1/16.

On mahdollista käyttää myös useita suodatuskertoja samalla suodattimella.

- 5 Suodatuksen jälkeen voidaan etsiä paikalliset maksimit. Tämän jälkeen on suotuisaa, että näitä maksimeita vastaavat pisteet (lähtöpisteet) tulostetaan puuston pituusmallin, suodatetun puustonpituusmallin ja ilmakuvan päälle. Olisi suotuisaa käyttää useita eri suodattimia ja suodatuskertoja. Käyttäjä valitsisi visuaalisen tarkastelun avulla käytettävät lopulliset lähtöpisteet.

Heurististen menetelmien avulla määritetään likiarvot kullekin latvukselle (läpimitalle, puulajille, puun pituudelle)

- 10 Puuston pituuden likiarvo saadaan suodattamattoman puuston pituusmallin ja lähtöpisteiden avulla.

- 15 Puulajin estimaatti saadaan laserin tuottaman intensiteettiarvon, ilmakuvasta saatujen sävyarvojen, sekä pisteparven muototekijöiden avulla. Kutakin lähtöpistettä vastaavan puun puulaji estimoidaan perinteisillä kaukokartoituksen luokittelumenetelmillä.

Kun puun pituus ja puulaji on estimoitu jokaiselle lähtöpisteelle, voidaan myös lähtöpisteitä vastaavan puun todennäköinen läpimitta. Läpimitalle lasketaan tilastollinen ala- ja yläraja, joita käytetään estämään usean puun joutuminen samaan segmenttiin ja toisaalta myös segmentin jakautuminen liian pieniin osiin.

- 20 Varsinainen segmentointi tehdään ryhmittelyanalyysin (engl. k-means clustering) avulla. Ryhmittelyanalyysissä latvuston mahdollisiksi keskipisteiksi otetaan latvamallin avulla lasketut lähtöpisteet siirrettynä z-akselilla hieman alaspäin (esim. puun pituus/6). Puiden latvukset oletetaan kolmiulotteisiksi kappaleiksi, esimerkiksi palloiksi tai ellipsoideiksi. Maanpintaa 1-2 m korkeammat pisteet huomioidaan analyysissä. k-means ryhmittelyalgoritmi pyrkii minimoimaan keskipisteen suhteen muiden pisteiden etäisyydet siihen. Prosessi on iteratiivinen. k-means algoritmi löytyy mm. Matlab-ohjelmistosta. Prosessissa kullekin pisteparven pisteelle määritetään etäisyyden avulla se latvus, mihin piste kuuluu. Sen jälkeen lasketaan
- 25

latvukselle uusi keskipiste. Prosessia jatketaan, kunnes pisteparven pisteitä ei sanottavasti enää muuteta.

Kukin segmentti/ryhmä analysoidaan. Prosessin äly on siinä, kuinka tehokkaasti osataan luoda uusia lähtöpisteitä, kun havaitaan, että segmentti/ryhmä koostuukin useammasta puusta. Ryhmittelyn aikana tulee hyödyntää kullekin potentiaaliselle puulle johdettuja heuristisia lähtötietoja latvuksen koon osalta. Jos havaitaan pisteparvea tutkimalla tai heurististen tietojen perusteella, että pisteparvi koostuu useasta puusta, jaetaan pisteparvi osiin antamalla useita lähtöpisteitä ja näiltä osin analyysi alkaa uudestaan. Jos pisteparvea ei voida jakaa osiin, mutta siinä todetaan tilastojen valossa olevan useita puita, huomioidaan puiden lukumäärä segmentin tietoihin. Kutakin puuta tai puurykelmää vastaavan pisteparven avulla määritetään latvuksen ääriviivoja vastaavat vektorit käyttäen tunnettuja menetelmiä.

15 Puustotunnusten laskeminen yksittäisten puiden ja puurykelmien avulla erilaisiin sovelluksiin

Puustotunnusten määrittämisessä esitettyä keksintöä voidaan soveltaa seuraavasti:

1. Tihennetyistä pisteparvista laskettujen yksittäisten puiden tunnusten käyttäminen inventoinneissa, kasvumalleissa, ympäristövaikutusarvioinneissa, lentoestekartoituksessa,
2. Laskemalla yksittäisille puille tai puurykelmille tihennetyistä pisteparvista mitattujen tietojen avulla muut puustotunnukset ja johtamalla koealakohtaiset tai kuvioittaiset tunnukset metsien inventoinnissa, kuvio 10.
3. Määrittämällä eri ajankohtina saatujen ja tihennettyjen pisteparvien avulla puuston muutos, kuten esimerkiksi puuston kasvu tai harvennukset. Kasvutietoa voidaan käyttää metsien inventoinnin lisäksi lentoestekartoituksessa, sähkölinjoja ympäröivien puiden monitoroinnissa ja leikkuutarpeiden arvioinnissa, kuviot 7, 8 ja 9.
4. Käyttämällä tihennetystä pisteparvesta laskettua latvamallia ilmakuvan sävyarvojen korjaamisessa
5. Ajantasaistaa vanha metsien inventointitietoa kahden eri ajankohtina mitatun ja myöhemmin tihennetyn pisteparven avulla, kuvio 11.

6. Menetelmää voidaan myös käyttää liikkuvassa kartoituksessa (engl. mobile mapping), jossa autosta tai telineeltä tehtyjä lasermittauksia tihennetään fotogrammetrisesti kuvien avulla.
7. Ohjelmistojen tekemiseen

5

Yksittäisten puiden tunnusten määrittäminen

Yksittäisten puiden tai puurykelmien tunnuksot voidaan määrittää olemassa olevilla laskentakaavoilla, jotka on esitetty mm. patentissa FI 112402. Seuraavassa on

10

Latvuksen keskimääräinen leveys L lasketaan latvuksen (segmentin) peittämän pinta-alan A avulla. Puun pituudeksi h oletetaan latvuksen sisältä löytyvä puuston pituusmallin maksimipiste (puun korkein kohta). Puun sijainti määritetään

15

maksimipistettä vastaavan x - ja y -koordinaattitiedon avulla. Pohjoisella havumetsäalueella puiden latvuksen keskimääräisellä leveydellä L on selkeä yhteys puun läpimitaan d . Läpimitan ja pituuden avulla voidaan määrittää puun kehitysluokka ja estimoida puun ikä. Yksittäisen puun pohjapinta-ala g (m^2/ha) saadaan rungon läpimitan d avulla. Runkoluku voidaan määrittää yksinkertaisesti kuvasta määritettyjen segmenttien (huomioiden, että segmentissä saattaa olla useita puita) lukumäärän avulla.

20

25

Puulajin voidaan määrittää vääräväri-ilmakuvan lähi-infrakanavan avulla siten, että ko. kanava erottaa lehtipuut. Männiköt sekä kuusikot erotetaan toisistaan perinteisellä kaukokartoitusluokittimella, jonka syöttötietoina ovat ilmakuvan kanavien keskiarvot segmentin alueelta, intensiteettitiedon keskiarvo segmentin alueelta sekä näistä lasketut tilastolliset momentit sekä mahdollisen intensiteetin profiilitiedon tilastolliset momentit.

30

Yksittäisen puun tilavuuden estimointi tapahtuu kolmella eri vaihtoehdolla: 1) tilavuuden estimointi pelkän puuston pituuden avulla, 2) tilavuuden estimointi puuston pituuden ja määritetyn läpimitan avulla ja 3) tilavuuden estimointi pituuden, läpimitan ja puulajin avulla. Laasasenaho (1982) (J. Laasasenaho, 1982, "Taper

curve and volume functions for pine, spruce and birch", *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108, 74 s.) on esittänyt funktiot, miten pituuden ja läpimitan avulla voidaan laskea yksittäisen puun tilavuus kullekin puulajille.

- 5 Fotogrammetrisesti tihennetystä pisteparvesta laskettujen yksittäisten puiden pituustietoja voidaan käyttää metsien inventoinnin lisäksi monissa sovelluksissa, kuten kaupunkien puuston seuraamisessa, lentoestekartoituksessa, jossa selvitetään lentoa rajoittavat liian korkeat puut, ja sähkölinjojen monitoroinnissa voidaan selvittää puut, jotka ovat liian lähellä sähkölinjoja.

10 Koealakohtaiset tai kuvioittaiset tunnuksat

Kuviossa 10 kuvataan suotuisa tapa jakaa eri tiheyksiset tihennetyt pisteparvet ja käytetyt puuston ominaisuuksien laskentamenetelmät.

- 15 Mikäli tihennetyn pisteparven tiheys on pienempi kuin 1 piste 16 neliömetriä kohden (vaihtoehto c) koemme suotuisaksi laskea karkea puuston latvuspeittoprosentti ja keskipituus, jotka antavat sitten kuviokohtaisen tilavuuden. Tämä menetelmän yksinkertaistettu tapa tuottaa tilavuusinformaatio on arvioida kuvainformaatiosta määritettyjen segmenttien koon perusteella latvuspeittoprosentti, pohjapinta-ala tai vastaava tiheyssuure ja yhdessä puuston keskipituuden avulla määrittää puuston tilavuus Ilvessalon relaskoopitaulukkojen tapaan (Tapion Taskukirja 1978). Vaihtoehtoisesti latvuspeittoprosentti voidaan määrittää myös siten, että lasketaan puihin osuvien laserpulssien lukumäärä suhteessa koko pulssimäärään halutulla alueella.

- 25 Mikäli tihennetyn pisteparven tiheys on parempi kuin 4 pulssia neliömetriä kohden (vaihtoehto b), on yksittäisten puiden ja puurykelmien tunnistaminen suotuisaa. Tähän pistetiheyteen tulee aina pyrkiä tarkoissa mittauksissa. Tällöin käytetään segmentoinnissa tai ryhmittelyssä saatuja pisteparvien avulla laskettuja segmenttejä avuksi puustotunnusten määrittelyssä. Yksittäisten puiden tunnuksen määritetään kuten edellä on kuvattu. Koealaa tai kuviota vastaavat puustotunnukset saadaan määritettyä laskemalla vastaavat tunnuksat käyttäen kaikkia yksittäisen puun

tunnuksia halutulla alueella. Esimerkiksi kuviota vastaava tilavuus hehtaaria kohden voidaan laskea summaamalla kaikkien yksittäisten puiden tilavuudet kyseisen kuvion sisältä ja jakamalla tilavuus kuvion koolla. Patentissa FI 112402 kuvatuilla jakaumaperiaatteilla voidaan parantaa estimaattien tarkkuutta näkymättömän puuston osan osalta. Keskipituus saadaan joko aritmeettisena keskiarvona yksittäisten puiden pituuksille tai painotettuna keskiarvona. Yleensä metsien inventoinnissa on tapana laskea painotettu keskipituus, jossa painokertoimena on kunkin yksittäisen puun pohjapinta-ala. Pohjapinta-ala hehtaaria kohden saadaan summaamalla kaikkien puiden pohjapinta-alat ja jakamalla se kuvion koolla.

10

Mikäli tihennetyn pisteparven tiheys on edellisten vaihtoehtojen välissä (Vaihtoehto a, kuvio 10), voidaan puuston ominaisuudet laskea seuraavasti. Puiden lukumäärä, pohjapinta-ala ja/tai latvuspeittoprosentti määritetään ilmakuvasta segmentoitujen latvusten avulla. Näytepuiden avulla määritetään keskipituus ja tuotetaan tilastoa yksittäisten puiden ominaisuuksista. Näytepuiksi valitaan vain ne puut, joista laser saa näytteen, mutta tihennetystä pisteparvesta valitaan puun korkein piste kuitenkin kuvaamaan kyseisen puun pituutta. Tällöin tulee edellyttää, että tihennetty piste ei voi poiketa kuin maksimissaan 0,5 (tai 1) m segmentin keskipisteestä, jotta sen katsotaan olevan hyvin todennäköisesti puun latvapiste. Tässä laskentatavassa näytepuiden oletetaan edustavan valtapuustoa satunnaisesti. Puiden lukumäärä saadaan laskettua samalla tavoin hahmontunnistuksen menetelmillä kuin edellä kuvatussa perusmenetelmässä. Tiheissä puuryppäissä ja harvemmissa pisteparvissa laskenta kannattaa suorittaa tihennettyjen pisteparvien ja hahmontunnistuksen tuottamien näytepituuksien ja latvuspeittoprosentin avulla, koska arvioitu runkoluku on aliarvio todellisesta runkoluvusta.

20

25

Metsän arvioinnin lisäksi menetelmää voidaan käyttää metsän arvon määrittämisessä, mikä on kiinteistötalouden kannalta mielenkiintoinen ongelma. Esitetty menetelmä on erittäin kustannustehokas, mutta myös tarkka metsän arvon määrittämisen keino.

30

Puuston muutosten arviointi

Aikaisemmin on esitetty (patenttihakemus 20030479, menetelmä, laitteisto ja ohjelma puiden kasvun määrittämiseksi), että laserin tuottamien tiheiden pisteparvien avulla voidaan laskea puuston kasvu. Uutta on, että fotogrammetrisesti tihennettyjen pisteparvien avulla voidaan laskea puuston kasvu samalla tavalla kuin tiheitä laserpisteparvia käyttämällä. Yksittäisille puille eri aikoina tehtyjen laserpisteparvien avulla on voitu todeta kasvu 39 cm tarkkuudella (julkaisematon teos Hyyppä ym. 2004). Fotogrammetrisesti tihennetyt pisteparvet ovat todennäköisesti hiukan epätarkempia, mutta kuitenkin alustavan tulokset viittaavat siihen, että yksittäisten puiden kasvu voidaan määrittää noin 50 cm tarkkuudella, esimerkiksi kuviossa 7. Kuviossa 7 mustat pisteet edustavat samasta puusta saatuja pisteitä vuonna x ja valkoiset pisteet edustavat samasta puusta saatuja tihennettyjä pisteitä muutamaa vuotta myöhemmin. Jo viiden vuoden kasvun määrittäminen on realistista yksittäisille puille. Koska kasvu voidaan määrittää yksittäisille puille kohtuullisella tarkkuudella, joka on jopa parempi kuin perinteisten hypsometrien käytöllä saatava kasvu, saadaan kuvioittaiset ja koealakohtaiset kasvut määritettyä erittäin tarkasti. 100 näytepuun avulla koealakohtainen kasvu voidaan määrittää jo noin 5 cm tarkkuudella ja kuviokohtainen kasvu on mahdollista jopa 1 cm tarkkuudella. Mikäli halutaan kasvua analysoida ja poistaa kaadettujen ja kaatuneiden puiden vaikutus, tulee eri aikoina mittatuista aineistoista tunnistaa vastinpuut, jotka vain otetaan mukaan analyysiin. Mahdollinen systemaattinen virhe kasvuestimaatille tulee kuitenkin kalibroida pois tuloksista tunnettuja menetelmiä käyttämällä.

Fotogrammetrisesti tihennettyjen pisteparvien avulla voidaan laskea myös latvuksien pintamalli. Laskemalla eri ajanhetkiä vastaavien latvuksien pintamallien erotus, voidaan havaita erotuskuvassa kaatuneet ja kaadetut puut, kuviot 8 ja 9. Kuviossa 8 on esitetty tihennettyjen pisteparvien avulla laskettu puuston pituusmalli vuosina x (kuvio 8a) ja vuosina y (kuvio 8b). Erotuskuva on esitetty kuviossa 8c. Suodatettu erotuskuva on esitetty kuviossa 8d ja segmentoinnin avulla määritetyt yksittäiset kaatuneet puut on esitetty kuviossa 8e.

Automaattisen tulkinnan keinoin tunnettuja menetelmiä käyttämällä (kynnystys, kohinan poisto, segmentointi) on mahdollista määrittää yksittäiset kaadetut tai kaatuneet puut, kuten kuviossa 9 on esitetty. Erotuskuvan, kynnystyksen, suodatuksen ja segmentoinnin toteuttaminen voidaan tehdä varsin yksinkertaisilla tunnetuilla menetelmillä. Noin 75 % kaadetuista puista voidaan automaattisesti tunnistaa käyttämällä yksinkertaisia segmentointialgoritmeja, kuten tunnettua watershed-segmentointia.

Latvuksien pintamallien erotuksesta voidaan määrittää myös muu kuin puuston latvuston pituuskasvu. Latvuston horisontaalinen ja tilavuuskasvu voidaan määrittää erotuskuvasta tunnettuja menetelmiä käyttäen.

Puiden kasvutietoja voidaan käyttää myös lentoestekartoituksessa, jolloin tihennetyistä pisteparvista laskettujen kasvutietojen avulla voidaan ennustaa, koska puut tulee kaataa. Samalla tavoin voidaan ennustaa sähkölinjoja ympäröivien puiden leikkuutarve.

Ilmakuvien sävyarvokorjaus

Ilmakuvissa esiintyy valaisu- ja mittauskulman muutoksista syntyvää vaihtelua, mikä johtuu kohteen anisotropiasta. Tämän vuoksi myös yksittäisen latvuksen Auringon puoleinen osa on vaalea ja toinen tumma. Tuntemalla latvuksen geometrinen pintamalli, voidaan kulman vaihtelusta johtuvaa sävyarvovaihtelua korjata tunnettuja menetelmiä käyttämällä. Sävyarvojen anisotropiakorjauksen jälkeen ovat ilmakuvan sävyarvot huomattavasti paremmin sopivia mm. puulajiluokitukseen.

Vanhan inventointitiedon ajantasaistaminen

Vanhan inventointitiedon avulla voidaan kalibroida niiden kuvioiden tiedot, joissa ei ole tapahtunut hakkuita kahden eri ajankohdan välillä. Muuttuneet kuviot voidaan määrittää tihennettyjen pisteparvien avulla tai pelkällä laser-pohjaisella muutostulkinnalla tai pelkällä fotogrammetrisellä muutostulkinnalla käyttäen näiden aineistojen tuottamia latvamalleja ja niiden erotuksia. Latvamallien avulla voidaan

määrittää myös kasvu ajanhetkien välillä. Tuntemalla kasvu ja tilastoa kaadetuista ja kaatuneista puista sekä molempien ajanhetkien kaukokartoitustiedon antamat tulokset ja aikaisemman inventoinnin kuvio- tai koealakohtaiset puustotunnukset, voidaan tunnetuilla tilastollisilla menetelmillä laskea uudet puustotunnukset, kuvio

5 11. Samalla saadaan referenssitietoa tämän menetelmän tulosten kalibrointiin.

Liikkuvan kartoituksen mahdollisuudet

Menetelmää voidaan hyödyntää ei pelkästään ilmakuvauksen ja ylhäältä tapahtuvan laserkeilauksen aineistoilla, vaan myös käyttämällä maastossa otettuja toisiaan

10 peittäviä kuvia ja laserpisteparvia. Näitä aineistoja voidaan tuottaa autosta, telineestä tai käsijalustoilta. Tässä tasossa voidaan tuottaa puista tarkka läpimitta, runkokäyrän tarkka malli sekä latvuksen tarkka malli poikkileikkauksena.

Yleinen soveltuvuus

15 Menetelmä soveltuu yksittäisten puiden, puuryppäiden, koealojen, kuvioden ja laajempien alueiden inventointiin. Seuraavassa on esitetty menetelmän soveltuvuutta valtakunnan metsien arviointiin, jotka on kuvioittaisen arvioinnin ohella tärkein inventointitapa Suomessa.

20 Valtakunnan metsien inventointi on esitetylle menetelmälle erittäin sovelias sovelluskohde. Laserkeilaimella yleensä tuotetaan kohteesta muutama sata metriä leveä kaistale. Tässä tapauksessa voidaan tuottaa joko leveämpi alue tai fotogrammetrisesti tihentää jo laserkeilauksella melko tarkasti kuvattuja yksittäisiä

25 puita. Valtakunnan metsien inventoinnissa laserkeilaimen kaltainen aineisto mahdollistaa sen, että maastotyön määrä vähenee ja laserkeilaimen avulla laskettuja yksittäisten puiden ja koealojen tietoja voidaan käyttää satelliittiaineiston opettamiseen. Valtakunnan metsien inventoinnissa myös lentäminen on tehokasta. Linjat voidaan suunnitella kattavan koko valtakunnan. Menetelmän avulla

30 valtakunnan metsien inventointi on mahdollista automatisoida miltein kokonaan. Metsäntutkimuslaitoksessa on pyritty kehittämään kuvaavan spektrometrin (Aisa) avulla puustotiedon keräämistä ja koealatiedon vähentämistä. Aisalla saadut tulokset

ovat kuitenkin merkittävästi huonommat kuin käyttämällä tämän keksinnön menetelmiä.

PATENTTIVAATIMUKSET

1. Menetelmä puuston kuvaamiseksi tai puuston ominaisuuksien määrittämiseksi laserkeilaimen ja kuvien avulla,
t u n n e t t u siitä, että
 - a) laserkeilaimen tuottamaa pisteparvea tihennetään fotogrammetrisesti toisiaan peittävien kuvien avulla,
 - b) puusto kuvataan tai puuston ominaisuudet määritetään tihennetyn pisteparven tai pintamallin avulla.
2. Patenttivaatimuksen 1 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kohdassa a) tuotetut tiedot ovat pisteiden kolmiulotteiset koordinaatit.
3. Jonkin patenttivaatimuksen 1-2 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kohdassa a) tuotetaan kolmiulotteisten koordinaattien lisäksi pisteille sävyarvot kuvainformaation avulla.
4. Jonkin patenttivaatimuksen 1-3 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että tihennetyn pisteparven luomiseen käytyssä laserkeilausaineistossa on useita pulsseja tai profiilitietoa (engl. full waveform data).
5. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 4 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kolmiulotteinen esitys puuston pituudesta (puuston pituusmalli) saadaan laskemalla tihennetystä pisteparvesta puuston ylimpiä osia vastaavan latvamallin sekä maanpintaa vastaavan maastomallin erotuksesta.
6. Jonkin patenttivaatimuksen 1-5 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että tihennetyn pisteparven avulla luotua latvamallia käyttämällä tehdään yksittäisille puille tai puuryhmille kuvan sävyarvojen anisotropiakorjaus.
7. Jonkin patenttivaatimuksen 1-6 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että kahtena eri ajankohtina saatujen, tihennettyjen pisteparvien tai pintamallien

avulla voidaan laskea puuston muutos, kuten esimerkiksi puuston pituus- tai leveyskasvu, harvennukset ja kaatuneet puut.

- 5 8. Jonkin patenttivaatimuksen 1-7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että yksittäisten puiden tai puuryhmien tunnistaminen (sijainnin tai latvuksien äärirajajojen määrittäminen) tehdään käyttämällä tihennettyä pisteparvea, pintamallia, pituusmallia, laserkeilauksen intensiteettitietoa, profiilitietoa tai/ja kuvien sävyarvoja sinänsä tunnetulla hahmontunnistusmenetelmällä.
- 10 9. Jonkin patenttivaatimuksen 1-7 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että yksittäisten puiden tai puuryhmien tunnistaminen (sijainnin tai äärireunan määrittäminen) tapahtuu kuvia käyttämällä ja halutuille puille saadaan pituus tihennetyn pisteparvi- tai pintamalliaineiston avulla.
- 15 10. Jonkin patenttivaatimuksen 1-9 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puustontunnusten arviointiin tai ajantasaistukseen käytetään vanhaa inventointitietoa, aikaisempia kuvia ja/tai laseraineistoja.
- 20 11. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 6 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puun rajaaman alueen sisältä saatujen näytepisteiden avulla määritetään joko kaksikulotteisesti (poikkileikkaus) tai kolmiulotteisesti puun geometria ja/tai puun hahmo joko puulajin tunnistamiseksi tai puuston mallintamiseksi.
- 25 12. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 11 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuudet, jotka saadaan pituusmallia analysoimalla ovat puiden sijainti, ikä, pituus, latvuksen läpimitta, latvusraja, rungon läpimitta, tukkipuun laatu, puun arvo, pohjapinta-ala, latvuspeittoprosentti, kehitysluokka, puulaji, runkotilavuus ja/tai runkoluku pinta-alayksikköä kohden ja näiden avulla johdettavat tilastolliset tunnuksat.
- 30 13. Patenttivaatimuksen 12 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puun rungon läpimitta voidaan johtaa latvuksen keskiläpimitan tai puun pituuden ja

latvuksen keskiläpimitan avulla ja mahdollisesti käyttämällä hyväksi tietämykseen perustuvia sääntöjä ja mahdollisesti kullekin puulajille erikseen.

5 14. Patenttivaatimuksen 12 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että runkoluku määritetään kuvasta tai pisteparvesta määritettyjen latvuksien lukumääränä.

15 15. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 12 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että latvuspeittoprosentti määritetään latvuksien peittämän pinta-alan suhteena koko pinta-alaan.

10 16. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 15 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että isommalle puurykelmälle määritetään yksittäisten puiden tai puuryhmien ominaisuuksien ja näiden tilastollisen tiedon lisäksi ylhäältä näkyvän puuston runkoluku ja latvuspeittoprosentti, joita voidaan käyttää koealojen ja kuvioiden 15 tunnuslukujen estimoinnissa.

20 17. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 16 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puuston tilavuus määritetään kokonaan tai osittain puuston keskipituuden ja latvuspeittoprosentin (latvuksien osuus kokonaispinta-alasta jaettuna pohjapinta- 25 alalla) avulla.

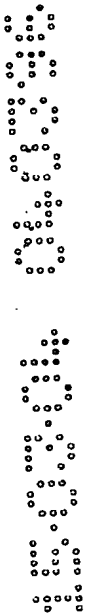
18. Jonkin patenttivaatimuksen 1 - 17 mukainen menetelmä, t u n n e t t u siitä, että puustotunnusten määrittäminen tapahtuu tietokoneohjelman avulla.

30 19. Tietokoneohjelma puuston kuvaamiseksi tai puuston ominaisuuksien määrittämiseksi laserkeilaimen ja kuvien avulla, t u n n e t t u siitä, että

a) laserkeilaimen tuottamaa pisteparvea tiennetään fotogrammetrisesti toisiaan peittävien kuvien avulla,

30 b) puusto kuvataan tai puuston ominaisuudet määritetään tiennetyn pisteparven tai pintamallin avulla.

20. Patenttivaatimuksen 19 mukainen tietokoneohjelma, t u n n e t t u siitä, että se suorittaa jonkin patenttivaatimuksen 2-18 mukaisen menetelmän.



25
L5

TIIVISTELMÄ

- 5 Keksinnön kohteena on menetelmä metsien inventointiin ja puustotunnusten määrittämiseen. Menetelmän avulla voidaan määrittää puiden, koealojen, kuvioiden tai laajempien metsäalueiden puustotiedot mittaamalla tai johtamalla yksittäisille puille tärkeimmät tunnusluvut. Menetelmä käyttää laserkeilainta ja toisiaan peittäviä kuvia. Toisiaan peittävien kuvien avulla tihennetään laserpisteparvet ja saatuja tihennettyjä pisteparvia käytetään tunnistamaan yksittäiset puut tai puurykelmät. Keksinnön kohteena on myös tietokoneohjelma menetelmän suorittamiseksi.

26
26

/

RESUMÉ

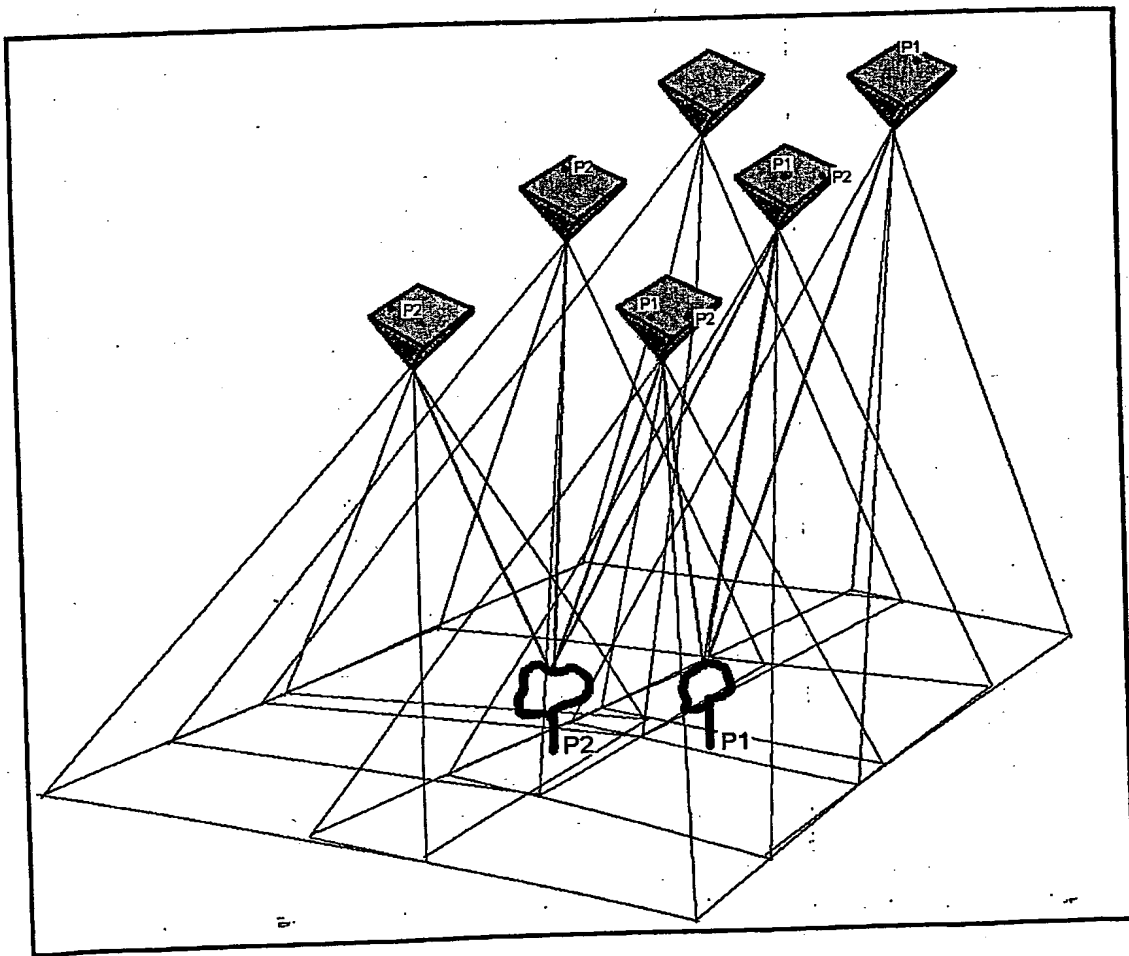
- 5 Uppfinningen gäller ett förfarande för inventering av skog och definiering av attribut för trädbestånd. Med hjälp av förfarandet kan man definiera data av trädbestånd för träd, testområden, träddungar eller för större skogsområden genom att mäta eller härleda de viktigaste attributen för enskilda träd. Förfaringssättet begagnar sig av laser scanner och överlappande bilder. Med hjälp av överlappande bilder förtätas laserpunktmoln och med hjälp av dessa förtätade punktmoln identifieras sedan
- 10 enskilda träd eller trädgrupper. Uppfinningen gäller även ett dataprogram för genomförande av förfarandet.



L7
1/9

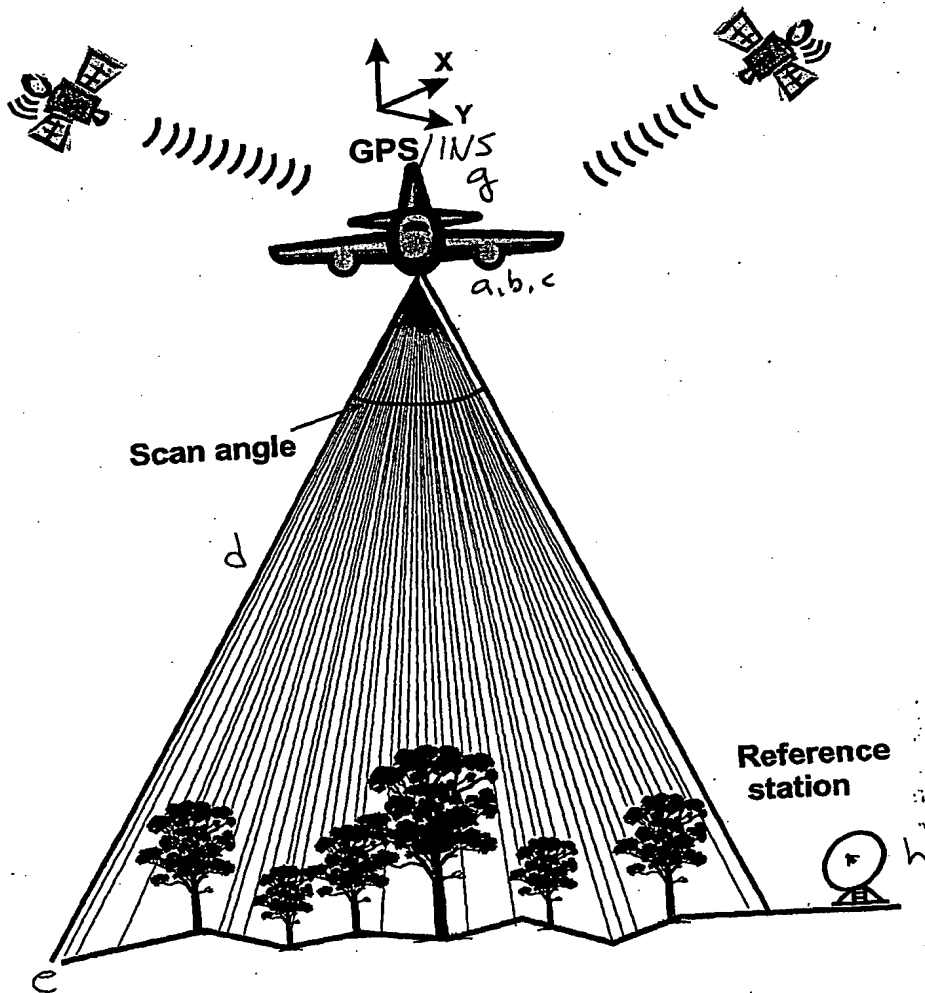
Kuviot hakemukseen MENETELMÄ PUUSTOTUNNUSTEN MÄÄRITTÄMISEKSI
LASERKEILAIMEN, KUVAINFORMAATION JA YKSITTÄISTEN PUIDEN
TULKINNAN AVULLA

5 KUVIO 1, FIG. 1



L7
2/9

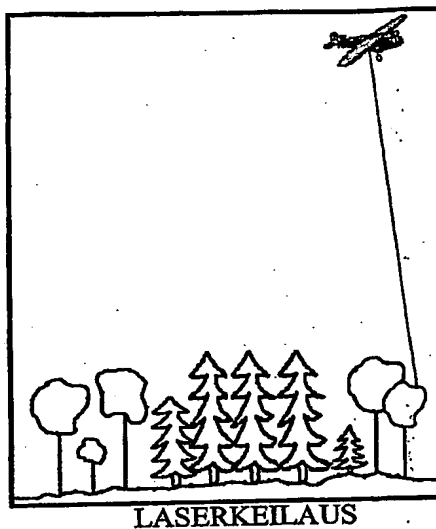
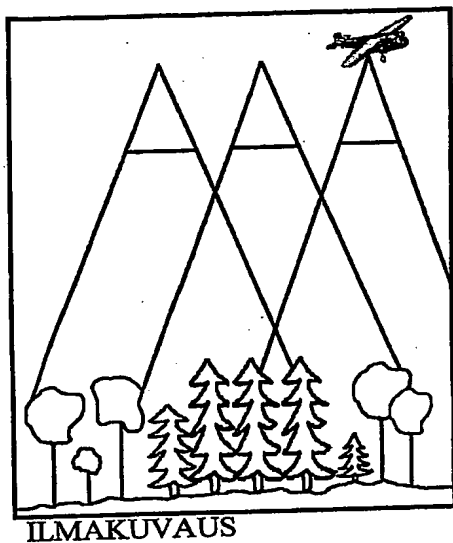
KUVIO 2, FIG. 2



f = kohteen e esitys x, y, z:ina

L7
3/9

KUVIO 3, FIG. 3.



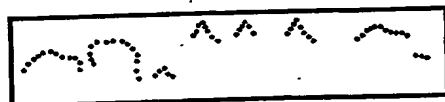
5

Laserhavainnoista laskettu puun latvaa kuvaava pisteparvi (a)



10

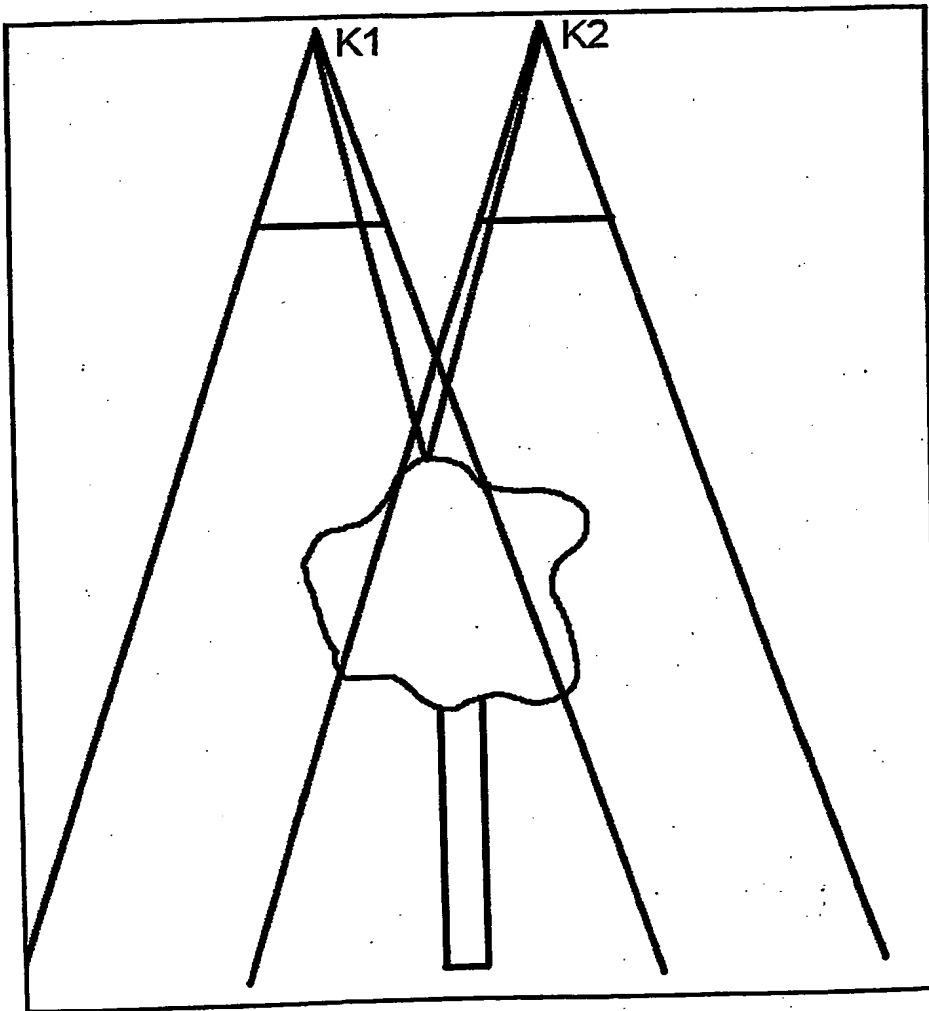
Fotogrammetrisesti tiennetty pisteparvi (b)



KUVIO 4, FIG. 4

Fotogrammetrisen pisteenmäärityksen periaate. Sama kohde havaitaan kahdelta toisistaan peittävältä kuvalta ja XYZ-kohdekoordinaatti lasketaan eteenpäinleikkauksena avaruudessa.

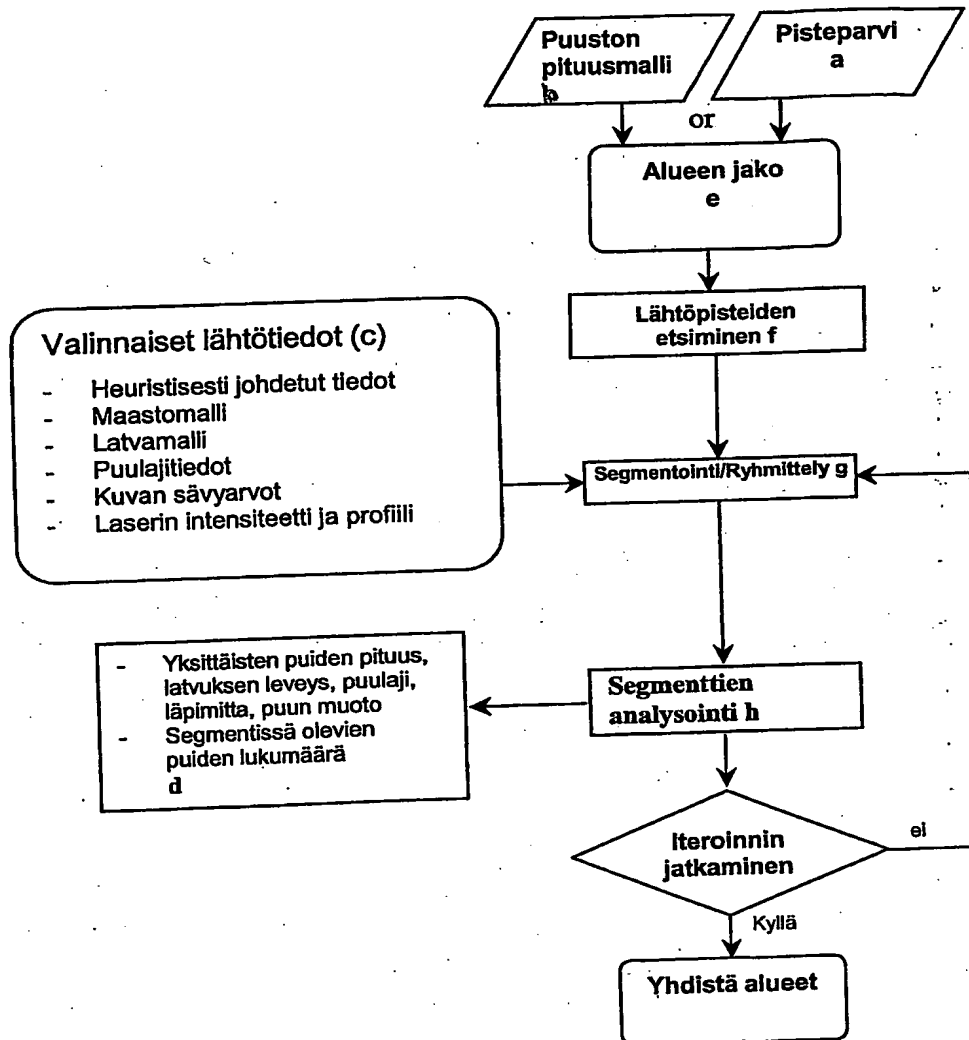
5



L7
6/9

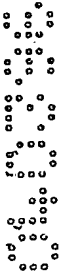
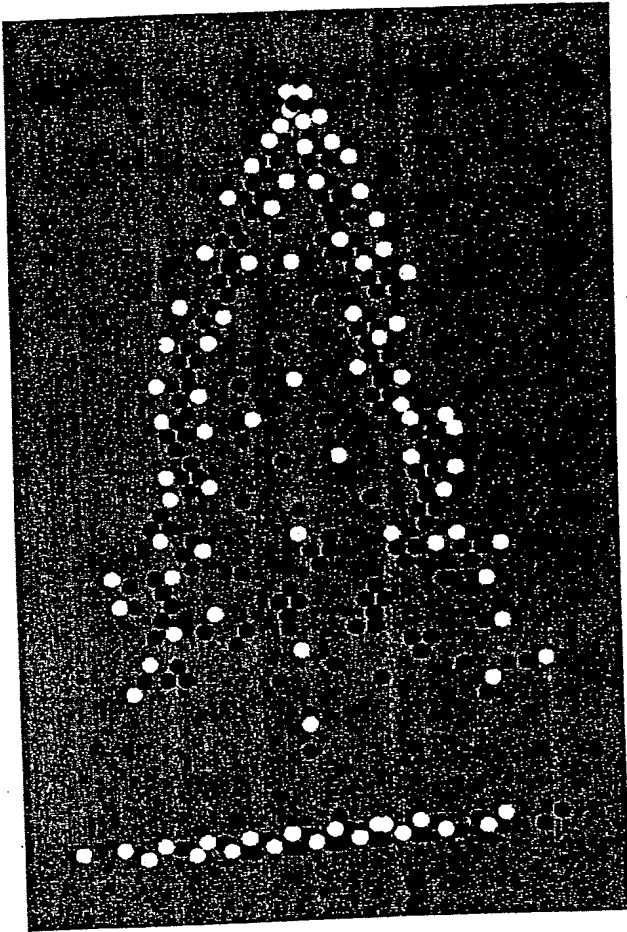
KUVIO 6, FIG. 6

5



L7
7/9

KUVIO 7, FIG. 7



5

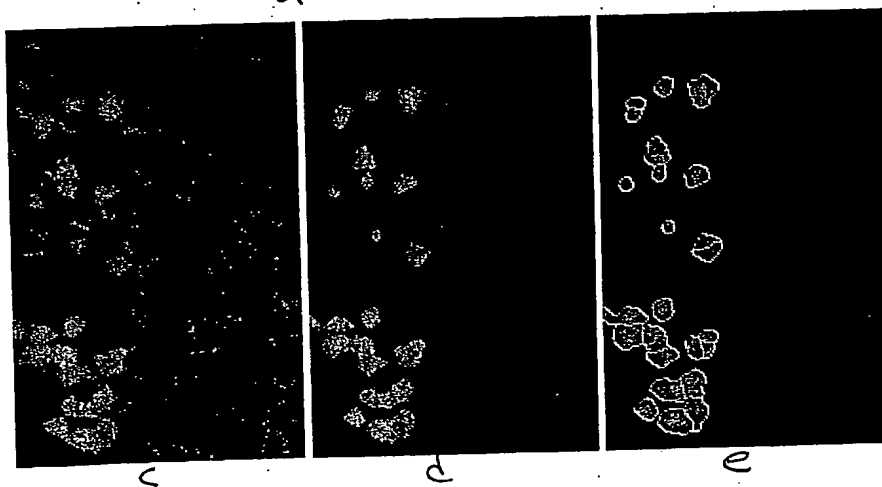
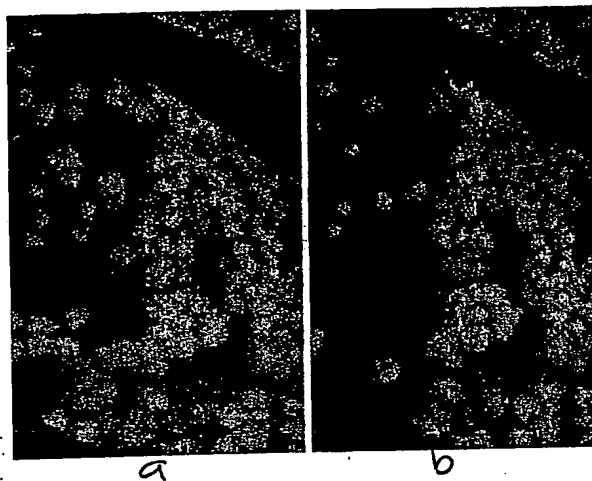
10

15

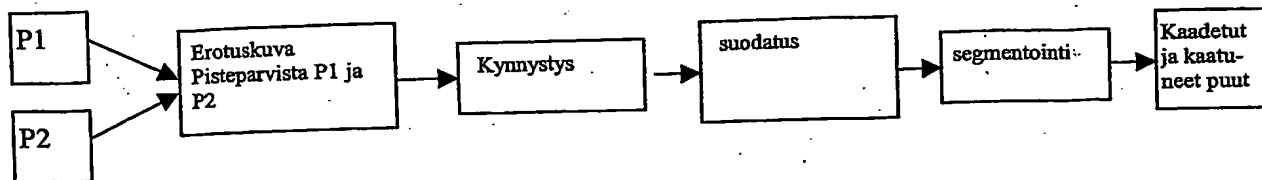
20

L7
8/9

KUVIO 8, FIG. 8

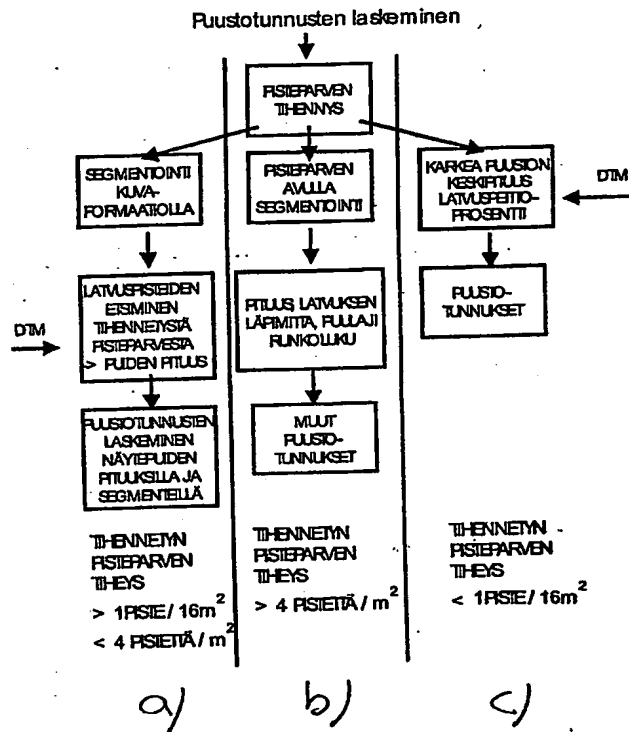


KUVIO 9, FIG. 9



LT
9/9

KUVIO 10, FIG. 10



5

KUVIO 11, FIG. 11

